

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

ДУБІЙЧУК Олег Юрійович



УДК 621.319.4

**ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ
ІМПУЛЬСНИХ КОНДЕНСАТОРІВ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ
ГРУП СЕКЦІЙ**

Спеціальність 05.09.13 - Техніка сильних електричних та магнітних полів

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Науково-дослідному та проектно-конструкторському інституті «Молнія» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Рудаков Валерій Васильович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри інженерної електрофізики.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Бржезицький Володимир Олександрович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри техніки та електрофізики
високих напруг;

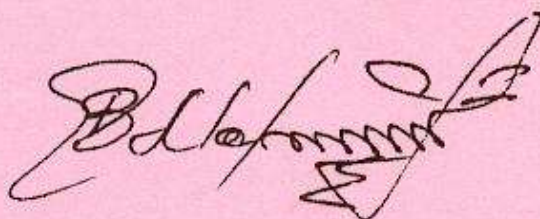
- доктор технічних наук, професор
Набока Борис Григорович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
професор кафедри ізоляційної і кабельної техніки.

Захист відбудеться «4» грудня 2008р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.08 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: м. Харків, вул. Фрунзе, 21, 61002.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «29» лютого 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.С.Марков

Повідомлення

Згідно наказу ВАК України №602 від 20 жовтня 2008 року вченим секретарем спеціалізованої вченої ради Д64.050.08 в НГУ "ХІІІ" призначено к.т.н., доцента Юр'єву Олену Юріївну.

Голова спеціалізованої вченої ради Д64.050.08 *Швиць* д.т.н., професор. В.Г. Данько

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток ефективних і маловитратних технологій є необхідною складовою енергозбереження та створення конкурентноздатної продукції. До цих технологій належать і технології, що використовують енергію розряду високовольтних імпульсних конденсаторів. Накопичувачі з високовольтних імпульсних конденсаторів також є енергетичною основою сучасних джерел імпульсів напруги і струму для фізичних досліджень та випробувальних генераторів сильних імпульсних електричних і магнітних полів.

Здебільше в цих високовольтних установках використовуються високовольтні конденсатори з номінальною напругою вище 10кВ, які, як правило, виготовляються з послідовним з'єднанням груп секцій. У цьому випадку через неідеальний розподіл значень ємності груп секцій можливі перенапруження на окремих групах секцій, що може привести до передчасної відмови конденсатора. При цьому, чим менша кількість послідовних груп секцій, тим менше можливі перенапруження, менше вартість конденсатора через зменшення об'єму алюмінієвої фольги, менше індуктивність, але менше і ресурс секцій через збільшення товщини діелектрика між обкладками. Відомі дані про ресурсні характеристики конденсаторів залежно від товщини діелектрика нечисленні і суперечливі. Тому актуальною та важливою науково-практичною задачею стає дослідження ресурсних характеристик секцій конденсаторів з різною товщиною діелектрика, визначення їх надійності та питомої енергії, і розробка методики вибору раціональної конструкції конденсатора з послідовним з'єднанням груп секцій, що складає напрямок дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідницьких тем МОН України «Дослідження процесів старіння ізоляції високовольтних конденсаторів і розробка методів діагностики і прогнозування терміну служби» (ДР №0101U003805) і «Розробка і дослідження макету швидкого потужного генератора з граничними параметрами імпульсів струму (ПГІС)» (ДР №0104U000445), а також госпдоговірних тем: «Розробка і виготовлення багатомодульного генератора імпульсного струму» (ТОВ «Протон-21», м. Київ), «Розробка ескізного проекту малоіндуктивного високовольтного конденсатора для проекту УНТЦ 2093» (ХНУ ім. Каразіна, м. Харків), «Розробка і виготовлення джерела імпульсного живлення прискорювача напругою 1МВ (ДЖП-1)» (ННЦ «ХФТІ» НАН України, м. Харків), «Розробка і виготовлення високовольтного конденсатора напругою 500кВ» (ІЕД, м. Харків), де здобувач в якості виконавця тем провів розрахунки щодо вибору конструкції конденсаторів з послідовно з'єднаними групами секцій на основі проведених ним ресурсних випробувань.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методики і практичних рекомендацій з вибору раціональної конструкції високовольтних імпульсних конденсаторів (ВІК) з послідовним з'єднанням груп секцій, враховуючи розбіжності значень ємності цих секцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виявити основні чинники, що впливають на вибір конструкції конденсаторів, і побудувати уточнену математичну модель порівняльного аналізу різних конструкцій з послідовним з'єднанням груп секцій з урахуванням цих чинників;

- експериментально дослідити залежність ресурсу і показників надійності (математичне очікування та середньоквадратичне відхилення з ресурсу) секцій силових імпульсних конденсаторів від товщини діелектрика;

- визначити ступінь перенапруження на послідовно включених групах секцій залежно від технологічного допуску на відхилення з ємності;

- розробити методику розрахунку і вибору конструкції конденсатора залежно від схеми послідовного з'єднання секцій з урахуванням розбіжності значень ємності секцій і показників надійності;

- розробити рекомендації з раціонального вибору конструкції конденсатора та провести апробацію їх на реальних конструкціях;

- визначити граничні питомі характеристики ВІК.

Об'єкт дослідження – старіння ізоляції високовольтних імпульсних конденсаторів у сильних електричних полях.

Предмет дослідження - надійність високовольтних імпульсних конденсаторів з різною товщиною діелектрика.

Методи дослідження. При визначенні коефіцієнту перенапруження на послідовно з'єднаних групах секцій застосовано методи теорії електричних кіл. Визначення законів розподілу безвідмовної роботи ізоляції проведено графоаналітичним методом з застосуванням критерію згоди Колмогорова і побудуванням графіків за допомогою метода найменших квадратів. Формулу для порівняльного аналізу ресурсів різних конструкцій конденсаторів з послідовним з'єднанням груп секцій побудовано на основі математичного моделювання за допомогою степеневих функцій. При визначенні надійності конструкцій конденсаторів застосовано методи структурної надійності та теорії імовірності. Експериментальні дослідження проводилися на реальних зразках секцій конденсаторів з використанням випробувальних високовольтних стендів, засобів вимірювань, методів планування експерименту і статистичної обробки результатів.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Вперше показано, що підвищення ресурсу ВІК можливо шляхом зменшення кількості послідовно з'єднаних груп секцій за рахунок збільшення товщини діелектрика між обкладками з урахуванням розбіжностей значень ємності секцій і показників надійності та за умови, що руйнування діелектрика відбувається на краю обкладки.
- Вперше відзначено, що величина розбіжності значень ємності секцій конденсатора істотно впливає на вибір товщини діелектрика та на кількість послідовно з'єднаних секцій. Вибір товщини діелектрика більш доцільно (с точки зору підвищення ресурсу конденсаторів з послідовно з'єднаними групами секцій) робити в діапазоні $80 \div 160$ мкм, а не в діапазоні $60 \div 80$ мкм як це робилось раніше.
- Уточнено залежність ресурсу ВІК від товщини паперово-касторового діелектрика, яка складається з двох ділянок з різними показниками степеня залежності ресурсу від товщини діелектрика (при товщині діелектрика менш ніж 80 мкм показник

ступеня дорівнює $m=2,14$, а при товщині діелектрика не менш 80мкм $m=1,72$, якщо дотримуються умови рівності кількості шарів діелектрика).

- Уточнено експериментальні залежності середньоквадратичного відхилення і коефіцієнта варіації нормально-логарифмічного закону розподілу за ресурсом у широкому діапазоні зміни товщини паперово-касторового діелектрика. Виявлено, що вони мають мінімум при товщині діелектрика 60÷80мкм.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи знайшли застосування в галузі силового конденсаторобудівництва:

- запропоновано методику вибору раціональної конструкції ВІК, що мають секції з різною товщиною діелектрика і різною кількістю послідовно з'єднаних груп секцій, яка враховує розбіжності значень ємності секцій та показники надійності, що дозволяє шляхом порівняння різних конструкцій ВІК зробити вибір найбільш надійної конструкції;
- отримано значення середньоквадратичного відхилення нормального логарифмічного закону розподілу з ресурсу та ресурсу секцій конденсаторів з паперово-касторовою ізоляцією в широкому діапазоні зміни товщини діелектрика 24÷160мкм і максимальних робочих напруженостях електричного поля 100÷130кВ/мм, що дозволяє обґрунтовано розраховувати конструкції конденсаторів при проектуванні нових та модернізації існуючих конструкцій;
- отримано експериментальну залежність ресурсу секцій з паперово-лавсановою ізоляцією, яка просочена касторовим маслом, від товщини діелектрика, відсоткової кількості плівки і від напруженості електричного поля для секцій з однаковою площею обкладок, яка дозволяє визначати робочі напруженості електричного поля для конструкцій з різним вмістом плівки при заданій надійності;
- розраховано і приведено залежності граничної питомої енергії конденсаторів від ресурсу з урахуванням надійності і загальної енергії в конденсаторах;
- результати роботи впроваджено при створенні нових типів ВІК: КИМ-120 для створення багатомодульного високовольтного імпульсного джерела живлення з запасною енергією 200кДж у ТОВ «Протон-21» (м. Київ); КИМ-125 для модернізації установки «Наdejда» замість конденсаторів КИМ-22, маючих у 1,5 рази меншу питому енергію в ХНУ ім. Каразіна (м. Харків); КИМ-131 для виготовлення джерела імпульсного живлення прискорювача напругою 1МВ у ННЦ «ХФТІ» НАН України (м. Харків); КИМ-136 для застосування їх у високовольтному джерелі живлення, що забезпечує отримання імпульсів високої напруги з малим фронтом для пучкового генератора наносекундних імпульсів в ІЕД (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача полягає в розрахунку перенапружень на послідовно з'єднаних групах секцій, побудові математичної моделі порівняльного аналізу конструкцій конденсатора з різною товщиною діелектрика, розробці методики і практичних рекомендацій щодо вибору раціональної конструкції ВІК з послідовним з'єднанням груп секцій, враховуючи розбіжності значень ємності та показники надійності. Здобувач провів ресурсні випробування, зробив аналіз і запропонував набір чинників, що впливають на вибір конструкції

конденсатора з послідовним з'єднанням секцій. Брав участь у розробці та виготовленні нових типів ВІК.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на 11-й та 12-й Міжнародній науковій школі-семінарі «Фізика імпульсних розрядів в конденсованих середовищах» (Миколаїв, 2003р., 2005р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми сучасної електротехніки ПСЕ-2002» (Київ, 2002р.); Міжнародному симпозиумі «Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (Харків, 2005р., 2006р.); XIII та XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2005р., 2006р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 12 наукових працях, з яких 10 у фахових виданнях ВАК України.

Структура і об'єм дисертації. Дисертаційна робота складається із змісту, списку умовних позначень та скорочень, вступу, основної частини з 4 розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 154 сторінки, в які входять 34 ілюстрації за текстом та 8 на окремих 5 сторінках, 19 таблиць за текстом, 5 додатків на 17 сторінках, список використаних джерел з 93 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми вибору раціональної конструкції ВІК з послідовним з'єднанням груп секцій, сформульована мета і задачі роботи, викладена наукова новизна отриманих результатів, відзначені практична цінність результатів в галузі конденсаторобудівництва, особистий внесок здобувача, вказані відомості щодо апробації результатів і їх публікації, приведена структура і об'єм дисертації.

У першому розділі проведено огляд нашої та закордонної літератури, з якого виявлені основні чинники, що впливають на ресурс ВІК. Ресурс істотно залежить від напруженості електричного поля, товщини діелектрика, відношення товщини обкладки до товщини діелектрика, числа шарів діелектрика між обкладками і практично не залежить від товщини обкладки. Перші чотири чинники необхідно враховувати при рішенні завдань, поставлених в дисертації.

Важливим також є визначення коефіцієнту перенапружень при послідовному з'єднанні груп секцій з урахуванням розбіжності значень ємності.

У другому розділі вироблені попередні рекомендації з конструктивного виконання високовольтних конденсаторів з урахуванням реальних розбіжностей значень ємності секцій, та приведені формули за визначенням перенапружень для трьох варіантів (*жорсткий, м'який, середній*) різного розподілу напруги на послідовно з'єднаних секціях. Ці варіанти характеризуються різною кількістю послідовно з'єднаних груп секцій усереднені конденсатора, які мають від'ємний k_2 та додатний k_1 допуски на відхилення значень ємності (загальна кількість послідовно з'єднаних груп секцій – n). *Жорсткий* варіант - коли з n послідовно з'єднаних груп секцій одна має від'ємний допуск з ємності, а $n-1$ – додатний; *м'який* - коли з n секцій одна має

додатний допуск з ємності, а $n-1$ – від'ємний; *середній* - коли t секцій мають від'ємний допуск з ємності, а $n-t$ – додатний. Коефіцієнти для цих трьох варіантів відповідно розраховуються за формулами:

$$\eta = \frac{n + k_1}{n - 1 - k_2 + (1 + k_1)}, \quad (1)$$

$$\eta = \frac{n + k_1}{(1 - k_2) + n - 1 + k_1}, \quad (2)$$

$$\eta = \frac{n + k_1}{n - t - k_2 + t + k_1}. \quad (3)$$

Залежності коефіцієнту перенапруження від кількості послідовно з'єднаних груп секцій приведені на рис. 1, 2.

Запропоновано формулу для порівняльного аналізу у вигляді відношення ресурсів 2-х порівнюваних конструкцій ВІК від найбільш впливових чинників

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)^{6,5} \left(\frac{d_{i32}}{d_{i31}}\right)^m \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \left(\frac{1 + \gamma_2}{1 + \gamma_1}\right)^{3,25}, \quad (4)$$

де $M_1, M_2, d_{i31}, d_{i32}, \gamma_1, \gamma_2, N_1, N_2, \eta_1, \eta_2$ – відповідно ресурс, товщина ізоляції, відношення товщини обкладок до товщини діелектрика, число шарів паперу між обкладками, коефіцієнти перенапруження 1-ої та 2-ої порівняльної конструкції.

Показник степеня m при d_{i3} за різними даними може коливатися в широких межах від 1,4 до 9,25 і, тому потребує корегування.

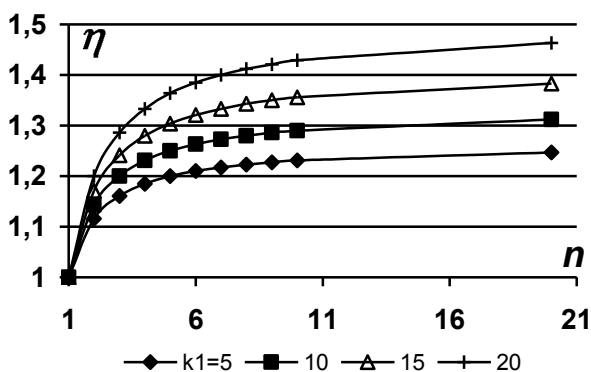


Рис.1. Залежність коефіцієнта перенапруження η від числа послідовно з'єднаних груп секцій n , де $k_2=20\%$ (жорсткий варіант)

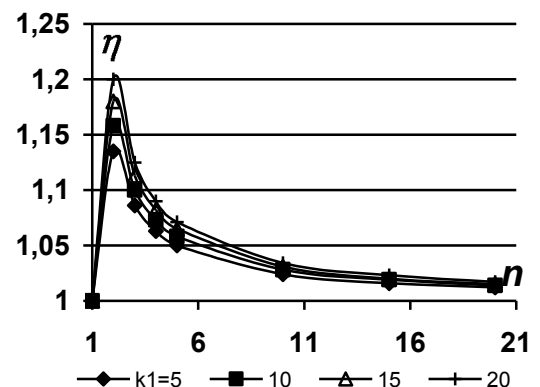


Рис.2. Залежність коефіцієнта перенапруження η від числа послідовно з'єднаних груп секцій n , де $k_2=20\%$ (м'який варіант)

Аналіз залежностей (рис. 1, 2) показує, що можливі перенапруження на секціях до 1,5 разів при врахуванні розбіжності з ємності до 20%.

Оскільки формула (4) отримана для конструкцій конденсаторів з різною кількістю послідовно з'єднаних груп секцій, та конденсатори мають секції з однаковою площиною та периметром обкладки, тоді при порівняльному аналізі ресурсів необхідно враховувати структурну надійність. Тому

$$\frac{M_{i\text{ сеп}}}{M_{j\text{ сеп}}} = \frac{M_i}{M_j} \times 10^{\sigma(z_j - z_i)}, \quad (5)$$

де $M_{ісер}$, $M_{jсер}$ - відповідно середні ресурси 2-х високовольтних конденсаторів з числом i і j послідовно з'єднаних груп секцій; M_i , M_j - середні ресурси відповідно i -тої і j -тої секції; σ - середньоквадратичне відхилення з ресурсу; z_i , z_j - квантілі, які відповідають надійностям P_i і P_j , в залежності від кількості послідовних з'єднань.

Вираз (5) отримано за припущенням, що закон розподілу (ЗР) з ресурсу є нормально-логарифмічним. З метою підтвердження ЗР для невеликої кількості експериментальних даних уточнена методика ідентифікації ЗР графоаналітичним методом шляхом побудови теоретичної залежності ЗР на імовірнісному папері за допомогою методу найменших квадратів і вибору кращого закону розподілу за допомогою критерію згоди Колмогорова. Розроблена програма, яка реалізує дану методику на ЕОМ. Таким чином кращими законами розподілу, виходячи з критерію згоди Колмогорова, є Вейбулла і нормально-логарифмічний.

Приведені результати ресурсних випробувань паперово-касторової ізоляції товщиною 24÷48мкм при напруженості електричного поля 125кВ/мм, які були використані при корегуванні показника степеня при товщині діелектрика між обкладками.

У третьому розділі здобувачем приведені результати ресурсних випробувань щодо визначення показників надійності секцій імпульсних конденсаторів у негерметичному корпусі з паперово-касторовою ізоляцією залежно від товщини ізоляції у діапазоні від 40мкм до 120мкм і порівняння їх з відомими результатами випробувань у герметичному корпусі з діапазоном товщини ізоляції від 32мкм до 72мкм.

Випробування проводилися в режимі: частота проходження керованих імпульсів - 2Гц, випробувальна напруженість електричного поля 130кВ/мм, частота розрядного струму 125кГц, декремент коливаний 1,38.

Залежності середнього ресурсу від товщини діелектрика приведені на рис.3 в логарифмічному масштабі.

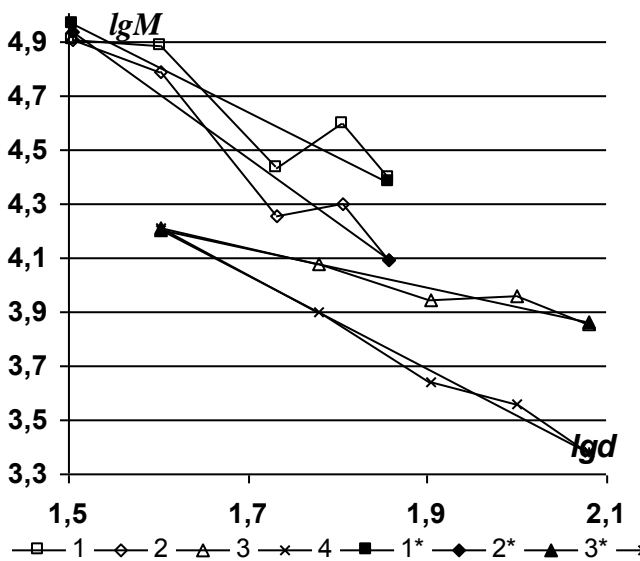


Рис.3. Експериментальні залежності $(lgM)_c$ від lgd для герметичних (1) і негерметичних (3) секцій і приведені до постійного числа шарів діелектрика (2) і (4) при $N=4$ (N - число шарів)

Оскільки прийнято, що

$$lgM \sim -m(lgd_{і3}), \quad (6)$$

де $d_{і3}$ в мкм, то криві 1 і 2 замінені лінійними функціями (прямі 1* і 2*), які побудовані методом найменших квадратів. За умови постійності числа шарів діелектрика між обкладками ($N=const$) отримані усереднені значення показника степеня m : $m=2,14$ при $d < 80$ мкм; $m=1,72$ при $240 > d \geq 80$ мкм (з урахуванням всього діапазону зміни $d_{і3}$).

На рис.4 приведені залежності середньоквадратичного відхилення (крива 1) і коефіцієнта варіації: $k = \sigma_{lgM} / (lgM)_{сер}$ (крива 2), герметичних секцій, а також ана-

логічні криві (3) і (4) для негерметичних секцій.

В обох випадках σ_{lgM} та k (рис.4) мають мінімум при товщині діелектрика $60 \div 64$ мкм.

У разі, коли $d < 60$ мкм (рис.4), середньоквадратичне відхилення апроксимується наступним виразом

$$\sigma_{lgM} = 0,1(60/d_{i3})^{1,5}, \quad (7)$$

де d_{i3} в мкм.

Враховуючі, що ресурс секцій обумовлений "крайовими ефектами", на рис.5 побудовано розрахунково-експериментальні залежності середньоквадратичного відхилення від товщини діелектрика. σ_{lgM} при $E=75$ кВ/мм не перевищує 0,1. На рис.5 точка «□» відповідає експериментальному значенню σ , яке отримано при ресурсному випробуванні секцій конденсаторів з товщиною

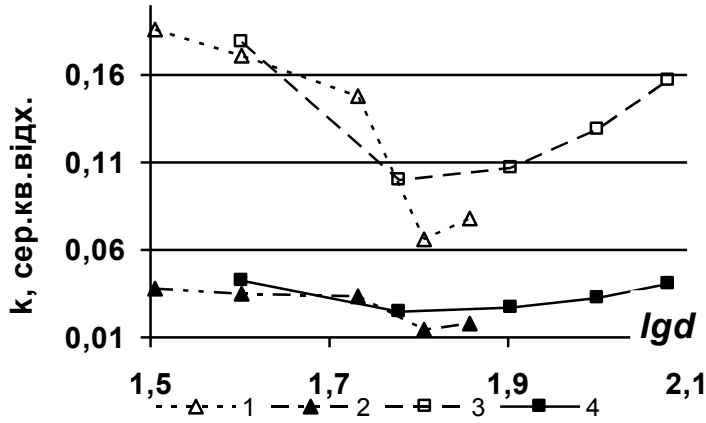


Рис.4. Залежності σ_{lgM} і k для герметичних і негерметичних секцій

діелектрика 160 мкм і напруженістю електричного поля 100 кВ/мм.

За отриманими результатами уточнена формула (4) для оцінки ресурсу конденсаторів з послідовно з'єднаними групами секцій з урахуванням перенапружень на секціях при $d_{i3} < 80$

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)^{6,5} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{2,14} \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \left(\frac{1+\gamma_2}{1+\gamma_1}\right)^{3,25}, \quad (8)$$

і при $d_{i3} \geq 80$ мкм

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\eta_2}{\eta_1}\right)^{6,5} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{1,72} \left(\frac{N_1}{N_2}\right) \left(\frac{1+\gamma_2}{1+\gamma_1}\right)^{3,25}. \quad (9)$$

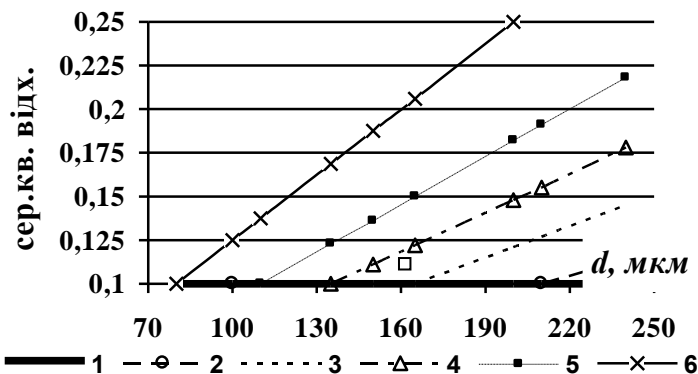


Рис.5. Розрахунково-експериментальні залежності σ_{lgM} від товщини діелектрика: E :

1 - 75 кВ/мм, 2 - 80 кВ/мм, 3 - 90 кВ/мм,
4 - 100 кВ/мм, 5 - 110 кВ/мм, 6 - 130 кВ/мм

Для формули (8) середньоквадратичне відхилення з ресурсу нормального логарифмічного закону розподілу визначатиметься за формулою (7) при $d_{i3} \leq 60$ мкм, а при $60 < d_{i3} < 80$ мкм $\sigma_{lgM} = 0,1$.

Для формули (9) середньоквадратичне відхилення визначається за рис.5 залежно від напруженості електричного поля і товщини діелектрика.

На підставі проведених ресурсних випробувань з урахуванням розбіжності значень ємності секцій та показників надійності запропоновано *методику вибору раціональної конструкції конденсатора з послідовним з'єднанням груп секцій*.

Вихідними даними з вибору числа послідовно включених груп приймаються загальна енергія W , що запасається; номінальна напруга U ; товщина листа конденсаторного паперу (КОН-2) $d_{л}$; товщина обклашки $d_{ф}$; технологічний допуск на відхилення з ємності ΔC (%); імовірність безвідмовної роботи P для терміну служби M . При розрахунку вважаються постійними: об'єм конденсатора або питома енергія, що запасається, режим роботи.

Приймаються наступні допущення: ресурс не залежить від товщини обклашки; при оцінці абсолютних значень ресурсу використовується відома емпірична формула для конденсаторних секцій з товщиною діелектрика 100мкм; розподіл відмов описується нормально-логічмічним законом; номінальна напруга на конденсаторі приймається кратною 10кВ ($U= 10, 20, 30\dots$ кВ).

Алгоритм порівняльного розрахунку:

1) як базова конструкція (основний варіант) приймається секція з товщиною діелектрика $d_{б,із}=100$ мкм і напруженістю електричного поля $E=100$ кВ/мм. Визначається значення середнього ресурсу для базової конструкції (ємність базової секції $C_{б}=12$ нФ) для секцій герметичного виконання за відомою формулою

$$\lg M_{сер} = 4,94 + 0,366\Delta + F, \quad (10)$$

де Δ - декремент коливань розрядного струму; F - частота розрядного струму в МГц;

2) визначається енергія базової секції при $E=100$ кВ/мм

$$W_c = \frac{\epsilon d_{б,із}^2 C_{б}}{2} = 0,6 \text{ Дж}; \quad (11)$$

3) загальне число таких секцій в конденсаторі становить

$$n = \frac{W}{W_c}; \quad (12)$$

4) приймаючи послідовну структурну схему побудови надійності, визначається середній ресурс конденсатора, що складається з n секцій

$$\lg M_{сер,к} = \lg M_{сер} - z\sigma, \quad (13)$$

де z - квантіль, відповідний імовірності P_c , тобто надійності однієї секції з ресурсом, який дорівнює $M_{сер,к}$; $M_{сер}$ - середній ресурс однієї секції; σ - середньоквадратичне відхилення, $\sigma = k \cdot \lg M_{сер}$; k - коефіцієнт варіації;

5) середній ресурс $M'_{сер}$ для інших варіантів виконання секцій з іншим значенням $d'_{із}$, але з тією ж напруженістю електричного поля, визначається за формулами (11, 12);

6) визначається середній ресурс конденсатора $M'_{сер,к}$ при товщині діелектрика $d'_{із}$ за формулою (13), вважаючи, що ресурс $M'_{сер}$ відповідає надійності секції $P'_c = \sqrt[i]{P_c}$,

де $i = \frac{d'_{із}}{d_{із}}$. Очікуваний ресурс конденсатора M'_p при заданій надійності P також ви-

значається за формулою (13) для відповідних значень квантіля і середньоквадратичного відхилення;

7) враховується технологічний допуск з ємності ΔC (%), для чого розраховується коефіцієнт перенапруження η для варіантів схем з'єднання секцій, коли число j послідовно з'єднаних груп з паралельно включеними секціями більше або дорівнюється 2 ($j \geq 2$). Тоді η_1 для групи секцій із значенням ємності, що має від'ємний допуск $k_2 = -\Delta C$, в припущенні, що решта $(j-1)$ всіх груп секцій має додатний допуск $k_1 = \Delta C$ визначається як

$$\eta_1 = \frac{j + 0,01\Delta C}{j(1 - 0,01\Delta C) + 0,02\Delta C}, \quad (14)$$

а для групи з $(j-1)$ секцій

$$\eta_2 = \frac{j - 0,01\Delta C}{j(1 - 0,01\Delta C) + 0,02\Delta C}. \quad (15)$$

При цьому завжди виконується умова $\eta_1 > 1$, а $\eta_2 < 1$;

8) використовуючи результати розрахунків п.6, визначаємо надійність групи з $(j-1)$ секцій і однієї групи секцій в припущенні, що $\Delta C = 0$ для порівнюваних варіантів конструктивного виконання конденсаторів, що мають надійність P :

$$P'_{j-1} = P^{\frac{j-1}{j}}, \quad P'_1 = \sqrt[j]{P}; \quad (16)$$

9) визначається ресурс кожної групи секцій, який відповідає надійності, що обчислена за п.8 з урахуванням перенапружень:

$$M'_1 = \frac{M'_{\text{сеп.к.}}}{\eta_1^{6,5}}, \quad M'_{j-1} = \frac{M'_{\text{сеп.к.}}}{\eta_2^{6,5}}; \quad (17)$$

10) приводиться ресурс груп секцій до одного ресурсу $M_{\text{ум}}$, відповідно перерахувавши надійність. Як $M_{\text{ум}}$ приймемо, наприклад, значення ресурсу M'_{j-1} групи з $(j-1)$ секцій. Тоді надійність $P_{\text{ум}}$ однієї групи секцій з від'ємним допуском з ємності, яка відповідає ресурсу M'_{j-1} , визначиться за значенням квантіля $z_{\text{ум}}$, який обчислюється за формулою:

$$z_{\text{ум}} = \frac{\lg M'_1 + z'_1 \sigma' - \lg M_{\text{ум}}}{\sigma'}, \quad (18)$$

де z'_1 - квантіль, відповідний надійності P'_1 ; σ' - середньоквадратичне відхилення, що відповідає середньому ресурсу цієї групи секцій з урахуванням перенапруження;

11) визначається надійність P'_k конденсатора, яка відповідає ресурсу $M_{\text{ум}}$

$$P'_k = P_{\text{ум}} P'_{j-1}; \quad (19)$$

12) остаточно ресурс конденсатора M'_p для надійності P дорівнює

$$\lg M'_p = \lg M_{\text{ум}} - (z_p - z'_k) \sigma'_k, \quad (20)$$

де z'_k - квантіль, відповідний надійності P'_k ; σ'_k - середньоквадратичне відхилення, яке відповідає середньому ресурсу конденсатора (визначається шляхом ітерацій з відомих значень P'_k і $M_{\text{ум}}$ за п.11).

Виконавши п.1÷12 для всіх можливих конструкцій, вибираємо таку, для якої ресурс M_p' буде максимальним при заданій надійності;

13) якщо розраховане значення ресурсу істотно відрізняється від заданого, проводиться перерахунок за пунктами 3÷12, при цьому заздалегідь розраховується нове значення напруженості поля за формулою

$$E_p = E^{6.5} \sqrt{\frac{M_p'}{M}}, \quad (21)$$

де M_p' - найбільше значення ресурсу із значень M_p' п.12; M - задане значення ресурсу.

Також визначається нове значення товщини діелектрика для базової конструкції як

$$d_{i3.нов.} = \frac{E d_{6.і3}}{E_p}. \quad (22)$$

В таблиці приведені результати порівняльного аналізу щодо вибору конструкції конденсатора КИМ-120 (j – кількість послідовно з'єднаних груп секцій, ресурс M_2 відповідає номеру конструкції №2, M_i – ресурс відповідної конструкції ($i=1÷6$), ΔC – технологічне відхилення значення ємності послідовно з'єднаних груп секцій, d_ϕ – товщина обкладки) на номінальну напругу 55кВ, ємністю 1,25мкФ, $d_\phi=30$ мкм з площею поперечного перетину пакету секції $S=490 \times 600$ мм і товщиною пакету $h=90$ мм.

Таблиця

Результати порівняльного аналізу конденсатора КИМ-120

№ конструкції	1	2	3	4	5	6
Товщина діелектрика, мкм	60	80	100	120	140	160
j (на практиці округляється до цілого)	13,1	9,8	7,86	6,55	5,61	4,91
$\Delta C=0$. Відношення ресурсів M_i/M_2	1,018	1,0	1,022	1,02	1,001	0,977
$\Delta C=0$; M_i/M_2 при $P=0,5$; $d_\phi=30$ мкм	0,928	1,0	1,127	1,179	1,198	1,238
* β_i/β_2 при $P=0,5$	1,31	1	0,768	0,656	0,593	0,533
$\Delta C=0$; M_i/M_2 при $P=0,5$; $d_\phi=10$ мкм	1,16	1,0	0,957	0,911	0,846	0,811
* β_i/β_2 при $P=0,5$	0,977	1,0	0,962	0,951	0,978	0,986
$\Delta C=10$; M_i/M_2 при $P=0,5$; $d_\phi=10$ мкм	1,127	1,0	0,988	0,978	0,965	0,951
* β_i/β_2 при $P=0,5$	1,006	1,0	0,931	0,886	0,858	0,841
Жорсткий варіант з урахуванням $k_1=k_2$	$k_1=10$	9	8	7	6	5
M_i/M_2 при $P=0,5$; $d_\phi=10$ мкм	1,005	1,0	1,108	1,202	1,304	1,389
* β_i/β_2 при $P=0,5$	1,128	1,0	0,834	0,721	0,635	0,576

* β_i/β_2 - у табл. 2: - відношення вартості пакетів секцій на 1 цикл заряд-розряд.

За представленою методикою розрахунку (п.1÷13) розраховані конструкції конденсаторів КИМ-120, КИМ-125 ($U=100\text{кВ}$; $C=1\text{мкФ}$; $a=490\text{мм}$, $b=600\text{мм}$; $h=90\text{мм}$, $d_{\text{ф}}=30\text{мкм}$), КИМ-131 ($U=100\text{кВ}$; $C=5\text{нФ}$, $L<10\text{нГн}$, $M=2\times 10^5$ циклів заряд-розряд), КИМ-136 ($U=500\text{кВ}$; $C=2\text{нФ}$), представлені на рис. (6÷9). Конденсатори виготовлені, пройшли приймально-здавальні випробування та успішно експлуатуються.

а б

Рис.6 Конденсатор КИМ-120:
а-габаритні розміри;
б-зовнішній вигляд;
 $j=5$, $d_{i3}=160\text{мкм}$

Рис.7 Конденсатор КИМ-125:
 $j=8$, $d_{i3}=144\text{мкм}$

а б

Рис.8 Конденсатор КИМ-131:
а - габаритні розміри;
б – зовнішній вигляд;
 $j=10$; $d_{i3}=120\text{мкм}$

а б

Рис. 9 Конденсатор КИМ-136:
а – габаритні розміри;
б – зовнішній вигляд;
 $j=66$; $d_{i3}=120\text{мкм}$

У четвертому розділі визначені показники надійності для комбінованого діелектрика порівняно з чисто паперовим, а також граничні питомі характеристики для паперових і паперово-плівкових діелектриків.

Проведені ресурсні випробування дев'яти типів секцій конденсаторів пластинчастого типу просочених касторовим маслом. Обкладки секцій виконані з алюмінієвої фольги товщиною 8мкм. Активна площа обкладок склала $6\times 10\times 3=180(\text{см}^2)$.

Секції були запресовані в один пакет під тиском 5×10^5 Па. Експеримент проводився при частоті проходження імпульсів 2Гц і 10Гц. Частота розрядного струму склала 125кГц, декремент коливань - 1,38.

Зразки випробовувалися при вільному доступі повітря до поверхні касторового масла. При проведенні експерименту змінювалися значення трьох незалежних чинників - робочої напруженості електричного поля E (кВ/мм), відсотка вмісту плівки Π (%), товщини діелектрика між обкладками d (мкм). Чинники змінювалися на 3-х рівнях: $E=120, 150, 180$; $\Pi=0, 28 \div 40, 56 \div 60$; $d=36, 60, 86$. Для зручності обробки прийняті допущення: інтервал зміни процентного вмісту плівки $28 \div 40\%$ відповідає 30% , а $56 \div 60\%$ - 60% ; товщина діелектрика 86мкм - розрахунковому значенню 84мкм.

Реалізований повний чинниковий експеримент з 27 дослідів. Як функція відгуку вибраний десятковий логарифм ресурсу M . Після ряду обчислень було виведено остаточний вираз для визначення середнього ресурсу, який має вигляд

$$\begin{aligned} (\lg M)_{\text{ср}} = & 4,294 - 0,488 \left(\frac{E - 150}{30} \right) + 0,255 \left(\frac{\Pi - 30}{30} \right) - \\ & - 0,273 \left(\frac{d - 60}{24} \right) - 0,04 \left(\frac{E - 150}{30} \right)^2 - 0,195 \left(\frac{\Pi - 30}{30} \right)^2 + 0,051 \left(\frac{d - 60}{24} \right)^2. \end{aligned} \quad (23)$$

Модель адекватно описує експериментальні результати за винятком результатів, які отримані для великих значень напруженості електричного поля і товщини чисто паперового діелектрика. В цьому випадку розвиток процесів руйнування діелектрика відбувається не на краях обкладок, а під обкладками і застосування формули (23) приводить до істотної похибки результату.

За підсумками експерименту паперово-плівкова ізоляція з 30% змістом плівки має декілька кращі питомі характеристики (із збільшенням до 10% по відношенню до чисто паперових секцій). А для конденсаторів з терміном служби близько 10^3 імпульсів і менш перевага паперово-плівкової ізоляції є очевидною.

Збільшення товщини обкладок приводить до зменшення питомої енергії, що запасється. В цей же час питома енергія паперово-плівкових секцій з обкладками великої товщини ($d_{\text{ф}} \geq 30$ мкм) незначно, але збільшується із збільшенням товщини діелектрика. Цей факт дуже важливий при розробці високовольтних малоіндуктивних конденсаторів, розрахованих на великі струми.

Приведена методика визначення питомої енергії, що запасється, в кінцевому результаті, за якою ресурс M із заданою надійністю P_c визначається за формулою (13), яка в даному випадку має вид $\lg M = (\lg M)_{\text{ср}} - \sigma U(P_c)$, де σ - усереднене середньоквадратичне відхилення, яке дорівнює найбільшому значенню з σ_1 і σ_2 (σ_1 - середньоквадратичне відхилення, обчислене за експериментальними даними, а σ_2 - середньоквадратичне відхилення між розрахунками і експериментальними значеннями). За результатами обчислення як σ вибрано значення $\sigma_2=0,232$.

На основі отриманих результатів розраховані граничні питомі характеристики ВІК для ідеального варіанту, коли $\Delta C=0$.

На рис.10 приведена розрахункова залежність питомої енергії від ресурсу для двох значень енергії, що запасається в одному корпусі конденсатора - $W_2=50\text{Дж}$ і $W_3=5000\text{Дж}$ і двох рівнях надійності $P_2=0,9$ і $P_3=0,999$.

Аналіз кривих (рис.10) показує, що при ресурсі 10^5 імпульсів в режимі слабо затухаючого коливального розряду питома енергія при надійності $0,999$ складе для

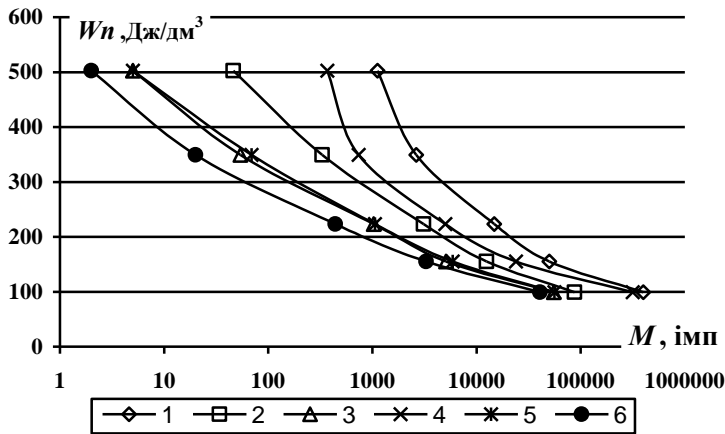


Рис.10 Розрахункові залежності $W_{\text{пит}}$ від M :

1- $W=50\text{Дж}$, $P=0,5$; 2 - $W=50\text{Дж}$, $P=0,9$; 3 - $W=50\text{Дж}$, $P=0,999$; 4 - $W=5000\text{Дж}$, $P=0,5$; 5 - $W=5000\text{Дж}$, $P=0,9$; 6 - $W=5000\text{Дж}$, $P=0,999$.

конденсатора з енергією 50Дж - 330Дж/дм^3 , для конденсатора з енергією 5000Дж - 275Дж/дм^3 . При ресурсі 10^5 імпульсів відповідно 90Дж/дм^3 і 85Дж/дм^3 . Із збільшенням ресурсу більше 10^5 імпульсів надійність практично не залежить від загальної енергії, що запасається в конденсаторі.

Реальні значення питомих характеристик кращих зразків конденсаторів різних виробників у режимі коливального розряду складають від $95,5\text{Дж/дм}^3$ до $189,2\text{Дж/дм}^3$ (ресурс складає при цьому $10^4 \div 10^5$ імпульсів, а енергія $560 \div 4500\text{Дж}$). Для аперіодичних режимів роботи ресурс за

такими ж значеннями питомої енергії може збільшуватися на один-два порядки.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень вирішена науково-практична задача підвищення ресурсу ВІК при варіації товщини діелектрика між обкладками та кількості послідовно з'єднаних груп секцій конструкцій конденсатора з урахуванням розбіжностей значень ємностей. У процесі досліджень зроблені наступні висновки:

- визначені основні чинники, що впливають на вибір конструкції - це напруженість електричного поля, товщина діелектрика між обкладками конденсатора, число шарів діелектрика між обкладками, відношення товщини обкладки до товщини діелектрика, показники надійності (середній ресурс і середньоквадратичне відхилення з ресурсу нормального логарифмічного закону розподілу безвідмовної роботи);
- розроблено уточнену математичну модель порівняльного аналізу різних конструкцій конденсаторів з послідовним з'єднанням груп секцій у вигляді формули степеневі залежності порівнюваних ресурсів конденсаторів від визначених чинників;
- визначено ступінь перенапруження на послідовно з'єднаних групах секцій залежно від розбіжностей значень ємностей секцій і вперше показано їх істотний вплив на вибір товщини діелектрика та кількість послідовно з'єднаних груп секцій;

- експериментально досліджено залежність ресурсу та показників надійності секцій силових імпульсних конденсаторів від товщини діелектрика:
 - уточнено експериментальну залежність ресурсу від товщини паперово-касторового діелектрика, яка складається з двох ділянок з різними показниками степеня залежності ресурсу від товщини діелектрика: при товщині діелектрика менш 80мкм показник степеня $m=2,14$; при товщині діелектрика не менш 80мкм - $m=1,72$ (за умови рівності числа шарів діелектрика);
 - середньоквадратичне відхилення при нормально-логарифмічному законі розподілу відмов має мінімум при товщині діелектрику $60\div 80$ мкм, який дорівнює 0,1. При зменшенні товщини діелектрика середньоквадратичне відхилення росте пропорційно $(60/d)^{1,5}$, а при збільшенні товщини діелектрика може залишатися постійним або збільшуватися при збільшенні напруженості електричного поля;
- отримано експериментальну залежність ресурсу секцій з паперово-лавсановою ізоляцією, яка просочена касторовим маслом, від товщини діелектрика, відсоткового змісту плівки і від напруженості електричного поля для секцій з однаковою площею обкладок. Найбільш істотний вплив на ресурс має напруженість поля, менш істотний - товщина діелектрика і відсотковий зміст плівки;
- запропоновано методику порівняльного аналізу ресурсу конструкцій конденсаторів, що мають секції з різною товщиною діелектрика і різною кількістю послідовно з'єднаних груп секцій, яка враховує одночасно вплив напруженості електричного поля з урахуванням розбіжності значень ємності, число шарів діелектрика між обкладками, товщину та об'ємний вміст діелектрика;
- розроблені рекомендації щодо раціонального вибору конструкції конденсатора, які використані при створенні нових типів ВІК КИМ з послідовно з'єднаними групами секцій;
- уточнено ресурсні залежності граничної питомої енергії конденсаторів з урахуванням надійності (за умови, що відхилення з ємності $\Delta C=0$), ресурсу і загальної енергії в конденсаторах;
- результати роботи використані при створенні нових типів ВІК КИМ-120 (ТОВ «Протон-21», м. Київ); КИМ-125 (ХНУ ім. Каразіна, м. Харків); КИМ-131 (ННЦ «ХФТІ» НАН України, м. Харків); КИМ-136 (ІЕД, м. Харків). Конденсатори виготовлені, пройшли приймально-здавальні випробування та успішно експлуатуються на відповідних підприємствах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рудаков В.В., Беспалов В.Д., Золотухин А.Н., Дубийчук О.Ю. Надёжность и удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Технічна електродинаміка. - Київ: ІЕ НАН України, 2002. - Частина 6. - С.89-93. *Здобувач брав участь в складанні плану повного чинникового експерименту, провів ресурсні випробування та визначив формулу регресії.*
2. Рудаков В.В., Беспалов В.Д., Бойко Н.И., Кравченко В.П., Золотухин А.Н., Дубийчук О.Ю. Высоковольтные импульсные конденсаторы разработки НИПКИ

«Молния» НТУ «ХПИ» // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПИ», 2002. - Т.1, №7. - С.47-58. *Здобувачем визначено конструктивні і технологічні особливості низки конденсаторів типу КИМ із збільшеною товщиною діелектрика, а також прийнята участь у їх виготовленні.*

3. Беспалов В.Д., Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю. Срок службы бумажно-касторовых конденсаторов в переходной области изменения рабочей напряжённости поля // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПИ», 2003. - Т.1, №1. - С.96-101. *Здобувач досліджував ресурсні залежності паперово-касторової ізоляції для малої товщини діелектрика.*

4. Рудаков С.В., Дубийчук О.Ю. Методика идентификации закона распределения случайной величины графоаналитическим методом // Системи обробки інформації.- Харків: ХВУ, 2003. - № 6.- С.79-85. *Здобувач брав участь в створенні уточненої методики ідентифікації закону розподілу випадкової величини та розробив програму реалізації її на ЕОМ.*

5. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Кравченко В.П. Предельные удельные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПИ», 2004. - Т.1, №7. - С.142-147. *Здобувач провів розрахунки показників надійності конденсаторів.*

6. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Рудаков С.В. Влияние технологического допуска по ёмкости на схему соединения секций высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПИ», 2004. - Т.1, №35. - С.136-143. *Здобувач зробив порівняльний аналіз ресурсів різних конструкцій конденсаторів і обґрунтував необхідність збільшення товщини діелектрика в них.*

7. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю. Сравнительный анализ показателей надёжности высоковольтных конденсаторов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПИ», 2005. - Т.1, №42. - С.104-109. *Здобувач провів розрахунки з виявлення впливу товщини діелектрика на ресурс і на показники надійності.*

8. Дубийчук О.Ю., Рудаков В.В. Экспериментальное определение показателей надёжности секций конденсаторов с бумажно-касторовой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – Харків, 2006. - №1. - С.71-75. *Здобувачем проведені ресурсні випробування секцій високовольтних конденсаторів, зроблений аналіз результатів і визначені показники надійності в залежності від товщини діелектрика.*

9. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Крамчанин Е.Г. Выбор конструктивного исполнения секций высоковольтных импульсных конденсаторов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПИ», 2006. - №17. - С.120-126. *Здобувачем запропоновано методику електричного розрахунку імпульсного конденсатора з урахуванням залежності ресурсу від товщини діелектрика і з урахуванням розбіжності значень ємності, заснованій на використанні логарифмічного нормального закону розподілу відмов.*

10. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю., Кравченко Ю.В., Еремеева Е.П., Кравченко В.П., Крамчанин Е.Г., Лысенко В.О. Особенности конструирования высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением секций // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». - Харків: НТУ «ХПІ», 2006. - №37. - С.119-128. *Здобувач запропонував та обґрунтував вибір товщини діелектрика конденсаторів КИМ-120, КИМ-125, КИМ-131, КИМ-136 в діапазоні 120÷160мкм.*

11. Рудаков В.В., Кравченко В.П., Золотухин А.Н., Дубийчук О.Ю. Опыт создания высоковольтных импульсных конденсаторов в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПІ» // Материалы 11-й Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». - Николаев: Атолл, 2003. - С.132-133. *Здобувачем визначено конструктивні і технологічні особливості низки конденсаторів типу КИМ із збільшеною товщиною діелектрика, а також прийнята участь у їх виготовленні.*

12. Рудаков В.В., Дубийчук О.Ю. Надёжность высоковольтных конденсаторов с увеличенной толщиной диэлектрика // Материалы 12-й Международной школы-семинара «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах». - Николаев: КП «Николаевская областная типография», 2005. - С.121-123. *Здобувач провів розрахунки з виведення корегуючого коефіцієнту при порівняльному аналізі ресурсів з урахуванням показників надійності.*

АНОТАЦІЇ

Дубийчук О.Ю. Вибір раціональної конструкції високовольтних імпульсних конденсаторів з послідовним з'єднанням груп секцій. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.13 – техніка сильних електричних та магнітних полів. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2008р.

Дисертація присвячена вибору раціональної конструкції ВІК з послідовним з'єднанням груп секцій. В роботі досліджено ресурсні характеристики секцій конденсаторів з різною товщиною паперового або паперово-лавсанового діелектрика просоченого касторовим маслом і розроблено методику вибору раціональної конструкції конденсаторів з послідовним з'єднанням груп секцій.

Проведено ресурсні випробування секцій ВІК. Визначені експериментальні залежності ресурсу від товщини ізоляції в діапазоні від 40мкм до 120мкм. Проведено аналіз отриманих результатів для негерметичних секцій у порівнянні з результатами для герметичних секцій. Розроблено методику вибору раціональної конструкції конденсатора з послідовним з'єднанням груп секцій на підставі проведених ресурсних випробувань та з урахуванням розбіжностей значень ємності і показників надійності.

Отримано експериментальну залежність ресурсу секцій з паперово-лавсановою ізоляцією, просоченою касторовим маслом, від товщини діелектрика і відсоткового змісту плівки, а також від напруженості електричного поля для секцій з однаковою площею обкладок. Розраховано граничні питомі характеристики ВІК.

Розроблено рекомендації щодо раціонального вибору конструкції конденсаторів та апробовано на реальних конструкціях конденсаторів. Результати роботи використано при створенні нових типів ВІК КИМ-120, КИМ-125, КИМ-131, КИМ-136 з підвищеною товщиною діелектрика від 120мкм до 160мкм.

Ключові слова: високовольтні імпульсні конденсатори (ВІК), ресурсні характеристики, товщина ізоляції, напруженість електричного поля, граничні питомі характеристики.

Дубийчук О.Ю. Выбор рациональной конструкции высоковольтных импульсных конденсаторов с последовательным соединением групп секций. - Рукопись.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 - техника сильных электрических и магнитных полей. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2008г.

Высоковольтные конденсаторы с номинальным напряжением выше 10кВ, как правило, выполняются с последовательным соединением групп секций. В этом случае из-за неидеального распределения значений емкости групп секций возможны перенапряжения на отдельных группах секций, что может привести к преждевременному отказу конденсатора.

В работе исследованы ресурсные характеристики секций конденсаторов с различной толщиной бумажного или бумажно-лавсанового диэлектрика пропитанного касторовым маслом и разработана методика выбора рациональной конструкции конденсаторов с последовательным соединением групп секций.

Выявлены основные факторы, которые влияют на ресурс ВІК и которые нужно учитывать при выборе рациональной конструкции конденсаторов с последовательным соединением групп секций. Такими факторами являются: напряженность электрического поля, толщина диэлектрика, число слоев диэлектрика между обкладками, отношение толщины диэлектрика к толщине обкладки, разброс значений емкостей секций. Определены перенапряжения на последовательно соединенных группах секций в зависимости от расхождения значений ёмкости для разных вариантов последовательного соединения секций. Получена формула для сравнительного анализа ресурсов различных конструкций конденсатора в зависимости от количества последовательно соединённых секций и раннее выявленных основных факторов, которые в существенной мере влияют на ресурс. Учтены показатели надежности при сравнительном анализе ресурсов высоковольтных конденсаторов как в зависимости от количества последовательно соединенных секций, так и с учетом вида закона распределения, который в свою очередь определялся по уточненной методике для малого количества экспериментальных значений.

Определены экспериментальные зависимости ресурса от толщины изоляции в диапазоне от 40мкм до 120мкм. Эта зависимость имеет два характерных участка при толщине диэлектрика меньше 80мкм и больше 80мкм, причем при большей толщине диэлектрика её влияние на ресурс существенно меньше. Среднеквадрати-

ческое отклонение и коэффициент вариации имеют минимум при толщине диэлектрика $60 \div 64$ мкм. Проведен сравнительный анализ полученных результатов для негерметичных секций с результатами для герметичных секций, который показал, что ресурс для герметичных секций в несколько раз больше.

Разработана методика выбора рациональной конструкции конденсатора с последовательным соединением групп секций на основании проведенных ресурсных испытаний с учётом расхождения значений емкостей секций и показателей надёжности.

Получена экспериментальная зависимость ресурса секций с бумажно-лавсановой изоляцией, пропитанной касторовым маслом, от толщины диэлектрика, процентного содержания пленки, напряженности электрического поля для секций с одинаковой площадью обкладок. Рассчитаны предельные удельные характеристики ВИК.

Разработаны рекомендации по рациональному выбору конструкции конденсаторов с последовательным соединением групп секций, которые апробированы на реальных конструкциях конденсаторов. Результаты работы использованы при создании новых типов ВИК КИМ-120, КИМ-125, КИМ-131, КИМ-136 с повышенной толщиной диэлектрика от 120 мкм до 160 мкм.

Ключевые слова: высоковольтные импульсные конденсаторы (ВИК), ресурсные характеристики, толщина изоляции, напряженность электрического поля, предельные удельные характеристики.

Dubiychuk O. Choice of rational construction of high-voltage pulse capacitors with successive connection of section groups. A manuscript.

The dissertation for the candidate degree in technical sciences by speciality 05.09.13 - Technique of the strong electric and magnetic fields. The National technical university the «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2008.

The dissertation is devoted to the choice of rational construction of high-voltage pulse capacitors with successive connection of section groups.

In the work resource characteristics of capacitor sections with the different thickness of dielectric have been investigated. And the technique of optimum construction capacitors choice with successive connection of section groups has been developed. The isolation of such sections is paper or paper-lavsan and saturated with castor oil.

Resource examinations of high-voltage pulse capacitors sections have been conducted. Experimental dependences of a resource on the thickness of isolation in a range from 40 мкм to 120 мкм have been defined. The analysis of the obtained results for airtight and untight sections has been carried out.

The technique of capacitors construction choice with the successive connection of group sections on the basis of the conducted resource tests has been developed. Experimental dependence of sections resource is got with paper-lavsan isolation, saturated with castor oil, from the thickness of dielectric and percentage of tape, and also from tension of the electric field for sections with the identical area of facings has been obtained.

The maximum value of specific characteristics of high-voltage pulse capacitors has been calculated.

Recommendations on the rational choice of capacitor construction have been proposed and realized on the real constructions of capacitors.

The results of this work on creation of new types of high-voltage pulse capacitors KIM-120, KIM-125, KIM-131 and KIM-136 with the increased thickness of dielectric from 120мкм ÷ 160мкм have been used.

Key words: high-voltage pulse capacitors, resource characteristics, thickness of isolation, tension of the electric field, the maximum value of specific characteristics.

A handwritten signature in black ink, consisting of the letters 'DUB' in a cursive, stylized font. The 'D' is large and loops around the 'U', and the 'B' is also cursive and connected to the 'U'.

Підписано до друку 27.08.2008 р.
Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman Суг. Віддруковано на ризографі
Ум.друк. арк. 0,9
Зам. № 643/08. Тираж 100 прим. Ціна договірна.

ВИДАВНИЦТВО

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Петровського, 25.
Тел. /факс: (057)700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua**

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції, серія № ДК №897 від 17.04 2002 р.